

자기부상열차의 동특성 시뮬레이션

김종문, 김춘경, 박민국
한국전기연구원 계측제어연구그룹

Dynamic Characteristics Simulation for Magnetically-Levitated Vehicle

Jong-Moon Kim, Choon-Kyung Kim and Min-Kook Park
I & C Research Group, Korea Electrotechnology Research Institute

Abstract - In this paper, dynamic simulation results for magnetically-levitated vehicles are presented. The dynamic equation and models for a half-bogie system are derived. The system includes primary suspension system, magnet module, spring-damper system and cabin. Also, the dynamic characteristics for the derived models are analysed. Using the results, levitation control algorithm can be designed to meet the performance requirements.

1. 서 론

지난 40여 년 동안 독일과 일본은 꾸준히 자기부상열차를 개발하여 왔으며, 각각 2004년 1월과 2005년 3월에 상업운전을 시작하였다. 자기부상열차는 기존의 바퀴식 열차와 비교하여 친환경적이고, 고속 성능이 우수하다는 장점이 있다. 이러한 장점 때문에 국내에서도 과학기술부 주관으로 지난 1998년 도시형 자기부상열차인 UTM(urban transit maglev) 시스템을 개발하였고, 2003년부터 산업자원부 주관으로 개선된 자기부상열차를 개발 중에 있고, 현재는 건설교통부 주관으로 실용화 사업을 추진 중에 있다.

한국전기연구원은 UTM 시스템의 부상제어기[1]를 담당하였는데, 현재 시속 70 km의 속도까지 올리는 데 문제가 없는 상태이다. 하지만 기술적 측면에서 상업화 수준에는 못 미치기 때문에 이러한 미비점을 해결해야만 한다. 부상시스템도 개선해야할 점이 여러 가지가 있으나 그 중 하나가 다이내믹 시뮬레이션이다.

다이내믹 시뮬레이션[2]은 제어대상 시스템의 실제 동작을 정확하게 모델링하는 것이라고 할 수 있는데, 자기부상열차의 경우, 부상 전차석과 부상제어기, 가이드웨이와 차량의 동적 특성을 포함한다. 특히 상전도 자기부상열차는 최고 속도가 시속 100 km 정도이므로 항상 이 정도의 속도를 고려해야만 한다. 그리고 가이드웨이는 직선, 커브, 오르막 또는 내리막 등 여러 가지 형상이 있으며, 재질과 형상에 따라 고유 주파수가 변한다. 또한 차량 속도에 따라 가이드웨이와 차량의 상호 작용도 다르게 된다. 다시 말해서, 전체적인 자기부상열차의 조건에 따라 동특성은 변하게 되며, 불안정한 상전도 시스템에 대한 안정화 제어기 설계 및 안정도 여유 확인, 객실에서 승차감 향상 그리고 경제적인 궤도를 설계하기 위해 다이내믹 시뮬레이션은 꼭 필요하다.

이 논문에서는 실차형 자기부상열차 부상제어기의 성능과 신뢰성을 향상시키기 위해 차량 단위의 다이내믹 시뮬레이션에 대한 결과를 언급한다. 궁극적인 목표는 차량 1량에 대한 것이지만 여기서는 1/3 차량에 대한 모델만 고려하며, 그 수학적인 관계식을 유도하고, 마그네트 모듈의 부상력을 입력으로 하고, 객실의 가속도를 출력으로 하는 전달함수에 대한 보드선도 결과에 대해 언급한다. 그리고 자기부상열차 전체에 대한 다이내믹 시뮬레이션과 관련된 추후 내용에 대해 언급하고자 한다.

2. 본 론

2.1 시스템 모델링

일본의 HSST(high speed surface transport) 시스템과 한국의 UTM 시스템은 모두 상전도 방식으로 기술적으로 매우 유사하다. 이 두 시스템의 형태와 사양은 매우 비슷한 데, 한 개의 차량은 세 개의 보기로 이루어져 있고, 보기 하나는 모듈 두 개 그리고 모듈 하나는 4개의 부상 마그네트에 의해 구성되어 있다. 그 모듈의 양쪽 끝은 스프링과 댐퍼로 객실과 연결되어 있다. 이 모델은 일반적인 자동차의 1/2 차량 모델과 그 구조가 유사하며, 그 운동 방정식도 큰 차이가 없다. 따라서 여기서 구한 수학적인 운동 방정식은 자동차의 1/2 차량 모델을 기본으로 구하였다. 그림 1은 자기부상열차의 1/6 차량 모델을 보여주고 있다. 그리고 자기부상 제어기, 마그네트 코일 및 가이드웨이 운동 방정식은 포함시키지 않았다. 마그네트 모듈과 객실 사이에 스프링 상수가 $k(N/m)$ 인 스프링과 댐퍼 상수가 $c(Nsec/m)$ 인 댐퍼가 있다. 일반적으로 상수 k 와 c 는 2차 서스펜션 시스템의 감쇠 계수 ζ 가 0.2, 대역폭이 1.5 Hz 내외로 결정하고, 이 값은 객실 내에서의 승차감과 직접적으로 관련이 있다.

그림 1에서 x_1 과 x_2 는 마그네트 모듈 양쪽 끝의 변위이며, x_3 와 x_4 는 객실 양쪽 끝의 변위이다. 그리고 $\dot{x}_1, \dot{x}_2, \dot{x}_3, \dot{x}_4$ 는 속도이다. 그리고 z_m 와 z_c 는 각각 모듈과 객실의 무게중심의 수직 방향 변위이고, ϕ_m 과 ϕ_c 는 각각 모듈과 객실의 무게중심의 피칭각이다. 만약 모듈과 객실의 피칭각이 매우 작다고 가정하면, 변위 x_1, x_2, x_3, x_4 와 변위 z_m, z_c 및 피칭각 ϕ_m 과 ϕ_c 는 다음과 같이 선형 관계가 있다.

$$\begin{aligned} x_1 &= z_m + l_{m1} \phi_m \\ x_2 &= z_m - l_{m2} \phi_m \\ x_3 &= z_c + l_{c1} \phi_c \\ x_4 &= z_c - l_{c2} \phi_c \end{aligned} \quad (1)$$

여기서 l_{m1} 와 l_{m2} 는 모듈의 무게중심에서 각 모듈 코너 중심 사이의 거리이고, l_{c1} 와 l_{c2} 는 객실의 무게중심에서 각각의 스프링 및 댐퍼까지의 거리가 된다.

그림 1의 차량에서 모듈과 객실의 무게중심의 수직 방향의 병진 운동과 회전 운동 방정식은 다음과 같다.

$$\begin{aligned} m_c \ddot{z}_c &= k(x_1 - x_3) + c(\dot{x}_1 - \dot{x}_3) \\ &\quad + k(x_2 - x_4) + c(\dot{x}_2 - \dot{x}_4) - m_c g \\ J_c \ddot{\phi}_c &= l_{c1} [k(x_1 - x_3) + c(\dot{x}_1 - \dot{x}_3)] \\ &\quad - l_{c2} [k(x_2 - x_4) + c(\dot{x}_2 - \dot{x}_4)] \end{aligned} \quad (2)$$

$$\begin{aligned} m_m \ddot{z}_m &= f_1 - k(x_1 - x_3) - c(\dot{x}_1 - \dot{x}_3) \\ &\quad + f_2 - k(x_2 - x_4) - c(\dot{x}_2 - \dot{x}_4) - m_m g \\ J_m \ddot{\phi}_m &= l_{m1} \{f_1 - k(x_1 - x_3) - c(\dot{x}_1 - \dot{x}_3)\} \\ &\quad - l_{m2} \{f_2 - k(x_2 - x_4) - c(\dot{x}_2 - \dot{x}_4)\} \end{aligned}$$

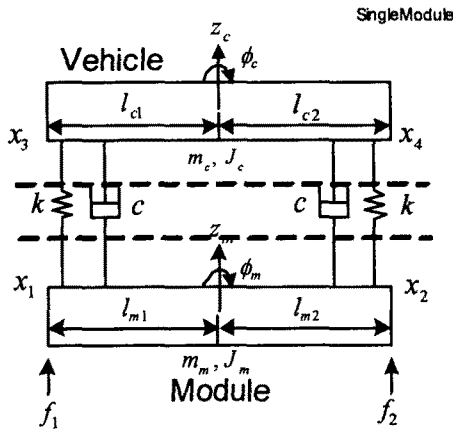
여기서 m_c 와 m_m 는 객실과 마그네트 모듈의 무게이고, g 는 중력 가속도이다. 이 때 모듈과 객실의 무게중심이 중앙에 있다고 가정하면 $l_{m1} = l_{m2} = l_m, l_{c1} = l_{c2} = l_c$ 이 된다. 또 모듈과 객실 끝에서의 가속도 $\ddot{x}_1 \sim \ddot{x}_4$ 는 다음과 같다.

$$\begin{aligned} \ddot{x}_1 &= -m_1 q_1 - m_2 q_2 + m_1 f_1 + m_2 f_2 - g \\ \ddot{x}_2 &= -m_2 q_1 - m_1 q_2 + m_2 f_1 + m_1 f_2 - g \\ \ddot{x}_3 &= m_3 q_1 + m_4 q_2 - g \\ \ddot{x}_4 &= m_4 q_1 + m_3 q_2 - g \end{aligned} \quad (3)$$

여기서

$$\begin{aligned} q_1 &= k(x_1 - x_3) + c(\dot{x}_1 - \dot{x}_3) \\ q_2 &= k(x_2 - x_4) + c(\dot{x}_2 - \dot{x}_4) \\ m_1 &= 1/m_m + l_m^2/J_m \\ m_2 &= 1/m_m - l_m^2/J_m \\ m_3 &= 1/m_c + l_c^2/J_c \\ m_4 &= 1/m_c - l_c^2/J_c \end{aligned} \quad (4)$$

이다. 그리고 부상력 f_1 과 f_2 는 각각 $k_f i_1^2 / \delta_1^2$, $k_f i_2^2 / \delta_2^2$ 이 되고, k_f 는 힘 상수, i_1 과 i_2 는 각각 전자석 1과 2의 전류, δ_1 과 δ_2 는 각각 레일과 마그네트 1과 2의 사이의 공극이다.



〈그림 1〉 자기부상열차의 차량 모델

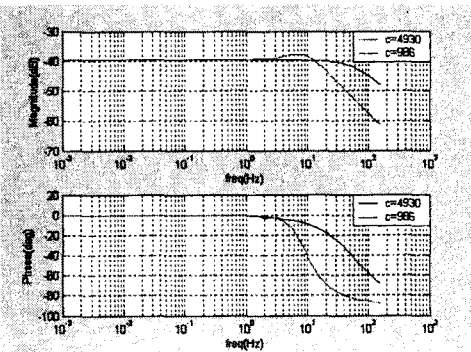
2.2 특성해석 결과

앞절에서 마그네트 모듈과 2차 서스펜션 및 객실로 이루어진 자기부상 시스템의 동역학 방정식을 구하였다. 이제 자기부상 시스템의 파라미터를 구하여 이 모델을 검증하기로 한다. 표 1의 시스템 파라미터는 일본 HSST 자기부상열차의 자료[3]를 참고로 하였다.

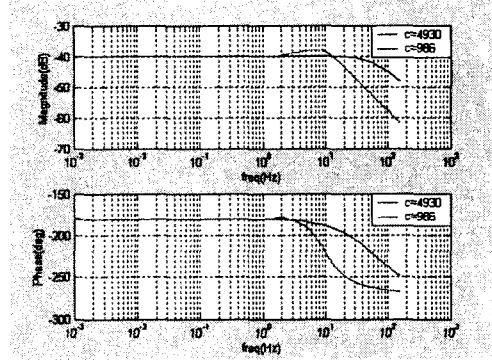
〈표 1〉 시스템 파라미터

파라미터	값
m_c	5880 kg
m_m	540 kg
J_c	2500 kg m ²
J_m	280 kg m ²
k	38700 N/m
c	4930 Nsec/m
l_c	1.25 m
l_m	1.25 m

특성해석 결과로서, 그림 2과 3은 입력 f_1 에 대한 객실의 가속도 \ddot{x}_3 와 \ddot{x}_4 의 전달함수에 대한 보드 선도이다. 여기서 댐퍼 상수 c 의 값을 정상적인 때와 20% 정도로 작아질 때의 전달함수의 차이를 보여 준다. 댐퍼 상수가 작아지면 객실 가속도의 크기가 커져 승차감에 대한 기준을 만족하도록 스프링 상수와 댐퍼 상수를 결정할 수가 있게 된다. 또한 차량 속도에 따라 모듈로부터 객실에 전달되는 힘의 주파수가 변하게 되고, 이 주파수가 2차 서스펜션 시스템의 공진 주파수와 같게 되면 객실의 가속도는 제일 크게 된다. 따라서 차량 속도와 승차감을 동시에 고려해야만 한다.



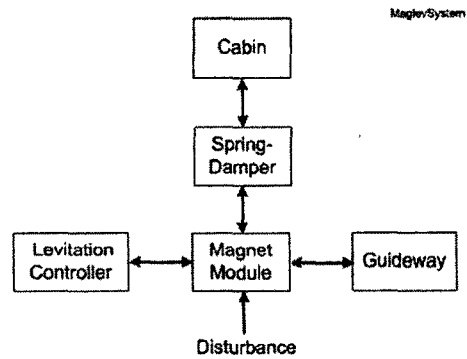
〈그림 2〉 힘 f_1 에 대한 가속도 \ddot{x}_3 의 보드선도



〈그림 3〉 힘 f_1 에 대한 가속도 \ddot{x}_4 의 보드선도

2.3 부상시스템 전체 모델링 전략

자기부상열차 시스템은 그림 4에서 보듯이 주로 부상제어기, 마그네트 모듈, 2차 서스펜션, 가이드웨이 및 객실로 이루어져 있다. 또한 차량이 시속 100 km의 속도로 움직이므로 항상이 속도값을 고려해야만 한다. 자기부상 제어기는 일반적으로 관측자와 상태 제어기로 이루어져 있으며, 가이드웨이는 유연한 특성을 지니고 있다. 차량의 속도에 따라서 가이드웨이의 굽힘 모드 특성이 변하게 되므로 가이드웨이를 설계할 때에는 차량 속도를 생각해야만 한다. 추후에 가이드웨이의 고유치 분석은 기계 해석용 소프트웨어인 ANSYS를 사용하며, 가이드웨이의 굽힘 모드를 주로 볼 예정이다. 그리고 다이나믹 시뮬레이션에서 중요한 것은 실제 시스템의 파라미터를 정확하게 추출하는 것이다.



〈그림 4〉 자기부상열차의 전체 블록 다이어그램

자기부상열차에서는 가이드웨이 형상이 매우 다양하다. 특히, 구배 또는 곡선에서의 운동은 매우 복잡해서 수식에 의한 해석은 매우 어렵다. 따라서 가이드웨이와 차량 전체 시스템에 대한 해석은 ADAMS/Control과 Matlab을 연결하는 동특성 해석 전용 툴을 구축해야 한다. 하지만 실제의 시스템과 시뮬레이션 결과에 대한 상호간의 검증은 지속적으로 해야 좋은 결과가 있게 된다.

3. 결 론

이 논문은 자기부상열차의 다이나믹 시뮬레이션을 위한 기본 연구로써, 1/6 차량 모델에 대한 기계적인 운동 방정식을 유도하고, 이 모델에 대한 특성해석을 하였다. 여기서는 부상제어기와 가이드웨이의 동역학은 제외하였기 때문에 추후에는 이것도 포함시켜 부상계 전체에 대한 동특성을 연구해야만 한다. 하지만 자기부상 시스템에서는 매우 다양한 외란 및 기구 문제가 발생하기 때문에 다이나믹 시뮬레이션은 쉬운 작업은 아니다. 따라서 정확한 파라미터 추출법과 함께 모델링 능력도 키우는 것이 매우 중요하며, 전기, 자기 및 기계시스템의 연계도 주요 이슈가 된다고 본다.

〈참 고 문 헌〉

- [1] 한국전기연구원, 부상 및 추진 제어기술 개발, 1998. 9.
- [2] P.K. Sinha, *Electromagnetic suspension: dynamics and control*. Stevenage, U.K. Peregrinus, 1987.
- [3] 미국 FTA, *Assessment of CHSST Maglev for U.S. Urban Transportation*, 2002. 7.